

往復多重並行配管を考慮した無散水融雪舗装体の伝熱モデル  
Heat transfer model for the snow-melting pavement  
with folded serpentine piping configurations

福原 輝幸  
FUKUHARA Teruyuki  
中村 明子  
NAKAMURA Akiko  
藤本 明宏  
FUJIMOTO Akihiro  
渡邊 洋  
WATANABE Hiroshi

## SYNOPSIS

A non-sprinkling snow-melting pavement has generally adopted groundwater heat, ground heat, heated warm water, etc. as heat sources. The temperature level of the heat source is around 10-15°C except heated warm water and is by no means high. Therefore, we have to better understand the heat transfer between a heat injection pipe and the surrounding pavement. This is indispensable to economical and reliable design of the non-sprinkling snow-melting pavement.

A theoretical model is proposed to evaluate the snow-melting performance of the pavements with folded serpentine piping configurations. The pavement heat exchanger is modeled as a straight panel incorporating both a going and return pipes can be treated as line heat sources to be added to the equation for vertical heat flow in the pavement. This results in a system of one-dimensional equations that is rapid for design calculations.

The accuracy of the numerical model is shown from the comparison of the fluid temperature distributions along the heat injection pipe and of the vertical temperature profile in the pavement at three different experimental sites. The model could also lead the overall heat transfer coefficients between the fluid in the heat injection pipe and the surrounding pavement.

## 1. はじめに

道路の融雪は大別して2つに分類される。1つは散水融雪、もう1つは無散水融雪である。散水融雪は地下水や河川水を路面に散水し、流体の顕熱を利用して融雪する。無散水融雪は地下水熱、地中熱、太陽熱、風力、温泉水および加熱温水などを熱源とし、温水が舗装体中に埋設された放熱管内を循環することで路面を加熱する。その他、

電熱線を舗装体に埋設する無散水融雪もある。地下水熱や地中熱の温度レベルは10～15°C前後であり、決して高くない。熱源の温度レベルが低い無散水舗装体の設計ほど、放熱管を含む舗装体の伝熱特性の正確な評価が必要となる。

無散水舗装体の伝熱理論に関しては、竹内・足立<sup>1)</sup>、浦上・佐藤<sup>2)</sup>、熊谷・野原<sup>3)</sup>、宮本ら<sup>4)</sup>および福原・橋本<sup>5)</sup>の研究があり、いずれも定常2次

元熱伝導方程式を基礎としている．竹内・足立<sup>1)</sup>および浦上・佐藤<sup>2)</sup>は，放熱管軸に直交する鉛直断面内の熱移動に注目し，隣接する2本の放熱管の間の舗装体表面を横切る熱フラックスを求め，融雪フラックスとして評価した．伝熱の概念は，図-1で示すような一方向単管モデルである．放熱管流体温度 ( $T_w$ ) は流下方向に低下するため，一方向単管モデルでは，流下方向の任意断面（放熱管入口から任意の距離， $x$ ）での  $T_w$  が与えられて初めて，その地点の融雪フラックスが決定される．従って，放熱管長が長くなる，もしくは循環流量が小さくなることによって，放熱管入口流体温度 ( $T_{inlet}$ ) と出口流体温度 ( $T_{outlet}$ ) に大きな差異が生じてくると，舗装体表面を横切る熱フラックスは距離， $x$  によって大きく異なる．

そこで，熊谷・野原<sup>3)</sup>は舗装体表面温度一定の境界条件下で，宮本ら<sup>4)</sup>および福原・橋本<sup>5)</sup>は路面積雪の温度を一定として，放熱管入口から出口までの放熱管流体温度分布を求めた．そして，流体温度分布に基づいて熱フラックスを計算し，その積分値を融雪面積で除した形で融雪フラックス

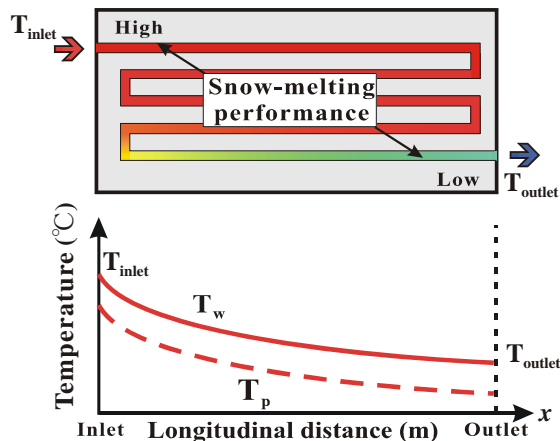


図-1 一方向単管モデル



写真-1 融雪むらの生じ難い放熱管の配置  
(往復多重並行配管)

を評価した．しかしながら，これらも一方向単管モデルであり，図-1で示すような  $T_w$  および舗装体温度 ( $T_p$ ) の流下方向の低下に起因して，融雪フラックス（融雪能力）には場所的な違いが存在する．

融雪むらが生じ易いか否かは，浦上・佐藤<sup>2)</sup>の実験から知れるように，放熱管の配管に起因するところが多い．写真-1は融雪むらが生じ難い配管を示したものである．熱源から送られてきた温水 (W.W.) は，屈曲した放熱管内を循環しながら放熱し，冷水 (C.W.) となって，放熱管入口に隣接する出口から流出する．この配管では，相対的に暖かい流体が流れる「行き」放熱管と，相対的に冷たい流体が流れる「戻り」放熱管が，隣接するように配置され，均一に融雪できる．筆者らはこの配管を往復多重並行配管と呼称する．筆者らもサーモグラフィによって往復多重並行配管の路面温度分布が加熱時に均一になりやすいことを示し，融雪むらも生じ難い結果を得ている<sup>6)</sup>．

そこで，本論文は往復多重並行配管を対象とした無散水舗装体の2次元伝熱モデルを提案し，モデルの妥当性および放熱管流体と舗装体間の熱貫流率（放熱管熱貫流率）を評価する．さらに，提案した伝熱モデルを用いて，放熱管の埋設深および舗装体の熱伝導率が無散水舗装体の表面層に流入する熱フラックス（舗装体熱フラックス）に及ぼす影響を明らかにする．

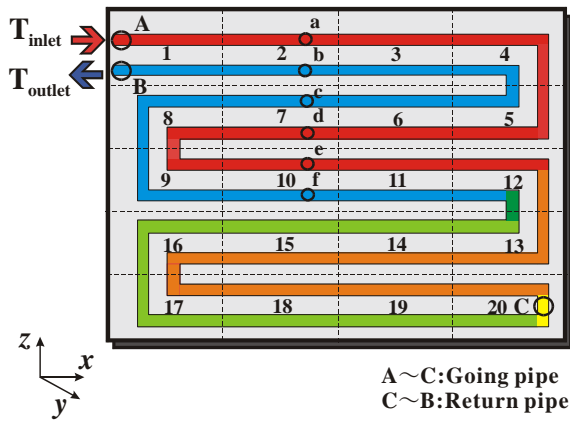
## 2. 無散水舗装体の伝熱理論

### 2.1. 往復多重並行配管を考慮した無散水舗装体モデル

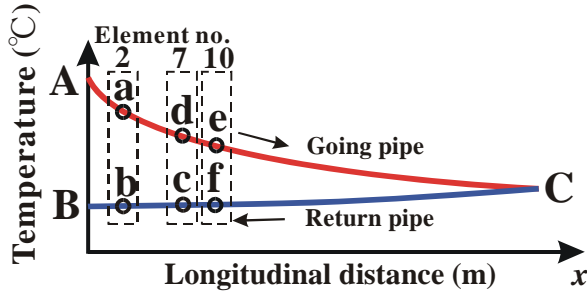
要素分割された往復多重並行配管を有する無散水舗装体モデルを図-2(a)に，同図に基づいて予想される放熱管流体温度の流下方向分布を図-2(b)に，それぞれ示す．放熱管の流下方向を  $x$  軸，横断方向を  $z$  軸，鉛直方向を  $y$  軸とする．要素2の「行き」放熱管の流体温度を  $T_a$  (点 a)，「戻り」放熱管のそれを  $T_b$  (点 b) とし，要素2の  $z$  方向に隣接する要素7の「行き」放熱管の流体温度を  $T_d$  (点 d)，「戻り」放熱管のそれを  $T_c$  (点 c) とする．要素7の  $z$  方向に隣接する要素10の「行き」放熱管の流体温度を  $T_e$  (点 e)，「戻り」放熱

管の流体温度を  $T_f$  (点 f) とし、折り返し点(C)の要素番号を 20 とする． 1つの要素内の「行き」と「戻り」放熱管の流体温度差 (a と b, d と c, e と f) に比べて, z 方向に隣接する要素の「行き」放熱管同士あるいは,「戻り」放熱管同士の流体温度差 (b と c, d と e) は小さい． すなわち,  $(T_a - T_b) \gg (T_c - T_d)$ ,  $(T_d - T_e) \gg (T_c - T_b)$ ,  $(T_d - T_e) \gg (T_d - T_f)$  かつ  $(T_e - T_f) \gg (T_d - T_e)$  である．

これより, 要素 2 と 7, 要素 7 と 10 の境界を横切るような z 方向の熱移動は近似的に無視できる． この場合, 図-2(a)の配管は図-3のような, 「行き」および「戻り」放熱管が間隔 (放熱管ピ



(a) 要素分割した往復多重並行配管モデル



(b) 放熱管流体温度分布

図-2 往復多重並行配管を考慮した  
無散水舗装体モデルと放熱管流体温度分布

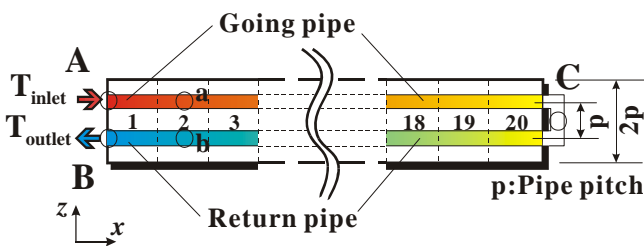


図-3 往復並行配管モデル

ッチ) p で並び, 流れ方向が互いに逆となるような往復並行配管の無散水舗装体モデルに置き換えられる．

## 2.2. 伝熱理論

ここでは, 図-3 の往復並行配管に従って, 放熱管流体の流下方向の熱移動, 放熱管と放熱管を含む舗装体要素間の熱移動, および舗装体中の鉛直熱移動に関する理論を記述する． 本論文ではこの伝熱理論を往復並行配管伝熱モデルと称する．

図-4 は, 図-3 の往復並行配管モデルにおける任意微小要素中の放熱管流体熱収支を模式的に示したものである． 同図のような微小要素における熱収支は,  $q$ : 放熱管に流出入する熱フラックス ( $\text{W/m}^2$ ),  $q_x$  および  $q_y$ : 舗装体要素に流出入する x 方向および y 方向の熱フラックス ( $\text{W/m}^2$ ),  $E$ : 単位表面積あたりの放熱管からの供給熱フラックス ( $\text{W/m}^2$ ) で支配される． 添字 in は流入を, 添字 out は流出をそれぞれ表す． また, 添字 1 は「行き」放熱管を, 添字 2 は「戻り」放熱管を表す．  $q$  は熱伝導と顕熱の和で,  $q_x$  および  $q_y$  は x および y 方向の熱伝導で,  $E$  は放熱管流体と周辺舗装体間の熱貫流フラックスで, それぞれ与えられる． すなわち,

$$q = -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} + (\rho c)_w V T_w \quad (1)$$

$$q_x = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \quad (2)$$

$$q_y = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \quad (3)$$

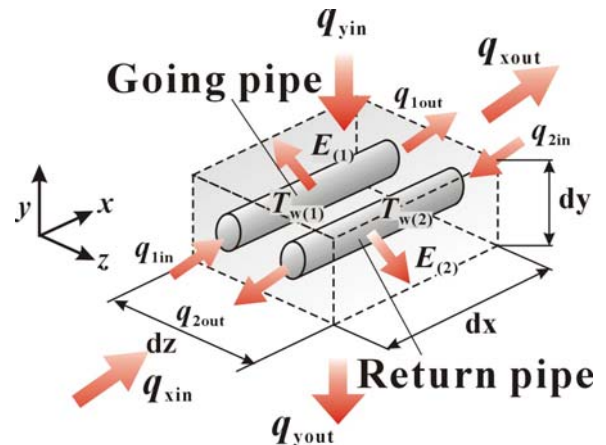


図-4 放熱管を含む微小舗装体要素の熱収支

$$E = \alpha(T_p - T_w) \quad (4)$$

ここに,  $(\rho c)_w$ : 放熱管流体の体積熱容量 (J/m<sup>3</sup>K),  $T_w$ : 放熱管流体の温度 (K),  $T_p$ : 放熱管周辺舗装体要素の温度 (K),  $\lambda_w$ : 放熱管流体の熱伝導率 (W/mK),  $\lambda_p$ : 放熱管を含む舗装体要素の熱伝導率 (W/mK),  $V$ : 循環流速 (m/s),  $\alpha$ : 放熱管熱貫流率 (W/m<sup>2</sup>K) である.

#### (1) 放熱管流体の熱収支

放熱管周囲舗装体要素への熱供給を考慮した放熱管流体の熱収支式は, 以下のようになる.

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_{w(m)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_w \frac{\partial T_{w(m)}}{\partial x} \right) - (\rho c)_w V \frac{\partial T_{w(m)}}{\partial x} + \alpha(T_p - T_{w(m)})\eta_1 \quad (5)$$

ここに,  $\eta_1$ : 放熱管体積に対する放熱管表面積の比 (m<sup>-1</sup>) である. 添字  $m$  は  $m=1$ : 「行き」放熱管,  $m=2$ : 「戻り」放熱管を表す.

#### (2) 舗装体の熱収支

放熱管を含む舗装体微小要素の熱収支式は, 以下のようになる.

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \eta_2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) - \alpha(2T_p - T_{w(1)} - T_{w(2)})\eta_3 \quad (6)$$

ここで,  $(\rho c)_p$ : 舗装体の体積熱容量 (J/m<sup>3</sup>K),  $\eta_2$ : 舗装体要素の正味体積に対する見かけの体積の比,  $\eta_3$ : 舗装体要素の正味体積に対する放熱管表面積の比 (m<sup>-1</sup>) である.

式(6)の右辺第 1 項および第 2 項は,  $x$  および  $y$  方向の熱伝導を, 右辺第 3 項は放熱管流体と舗装体要素間の熱移動を, それぞれ表す.

ここで, 舗装体温度 ( $T_p$ ) が水平面内で一様と仮定すれば, 舗装体の  $x$  方向の熱移動は無視できるので, 式(6)は以下のような鉛直次元の熱伝導方程式となる.

$$(\rho c)_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \eta_2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) - \alpha(2T_p - T_{w(1)} - T_{w(2)})\eta_3 \quad (7)$$

当然ながら, 放熱管を含まない舗装体要素の熱

収支式は, 式(7)において,  $\eta_2=1$  かつ, 右辺第 2 項=0 となる.

### 2.3. 境界条件

#### (1) 舗装体表面

舗装体表面温度  $T_{surf}$  は, 15 分毎に実測された経時変化を境界条件として与える.

$$T = T_{surf}(t) \quad (8)$$

なお,  $T_{surf}$  は地表面下 0.01m の実測温度で代表させる.

#### (2) 底面境界

路盤の熱物性値が未知なことを考慮して, 舗装体底面を解析領域底面とし, 15 分毎に実測された舗装体底面温度  $T_{bot}$  の経時変化を境界条件として与える.

$$T = T_{bot}(t) \quad (9)$$

なお, 任意の時間の境界温度は実測値を線形内挿して与えられる. また, 計算には積分有限差分法 (陽解法) を用いる.

### 3. 実験データ

計算結果の比較対象となる舗装体の一覧を表 1 に示す. 同表は, ① 兵庫県美方郡村岡町の道の駅「ハチ北」の無散水舗装体, ② 福井大学内の掘削杭熱交換システム (**B**ore-**h**ole **H**eat **E**xchange **S**ystem: 以下 BHES と呼称) に接続する無散水舗装体, ③ 福井大学内の地中熱を利用したエコハウスに採用された無散水屋根融雪コンクリートパネルの詳細である<sup>7)</sup>.

道の駅「ハチ北」と福井大学内 BHES の無散水舗装体は, 放熱管が埋設された珪石コンクリート (2 次製品) とその上に敷設された厚さ 0.03m のアスファルト舗装で構成される. 放熱管の埋設深は 0.06m である. 屋根融雪コンクリートパネルは, 厚さ 0.07m であり, 放熱管の埋設深は 0.03m である. なお, 放熱管流体温度は入口から出口の間の 4 箇所測定される.

放熱管の配管ピッチはいずれも 0.1m であり, 経験に基づいた融雪むらが起こりにくい配管であ

る。温度は熱電対によって自動計測され、舗装体温度は、無散水舗装体中央部の「往き」放熱管と「戻り」放熱管の中間で求められた。

#### 4. 実測値と解析値の比較

ここでは、舗装体温度および放熱管流体温度に及ぼす放熱管熱貫流率 $\alpha$ の影響を議論する。

図-5 は道の駅「ハチ北」における実測および解析結果である。図中には放熱管熱貫流率 $\alpha$ を、80 (W/m<sup>2</sup>K)、100 (W/m<sup>2</sup>K) および 120 (W/m<sup>2</sup>K) と変えたときの結果を併せて示す。

図-5(a)は、任意時刻における放熱管流体温度 $T_w$ および、放熱管を含む舗装体要素の温度 $T_{pp}$ の $x$ 方向変化である。 $T_w$ は入口( $x=0$ )から出口に向かって指数関数的に低下する。 $\alpha$ の増加とともに出口の $T_w$ が低下するため、入口と出口の流体温度差は大きくなる。一方、 $T_{pp}$ は $x$ 方向に渡りほぼ等しく、 $\alpha$ の増加とともに高くなる。これより、舗装体上の融雪は均一に行われることが推察でき、舗装体中の $x$ 方向の熱移動は無視できる。また、 $\alpha$ は舗装体表面温度に影響を及ぼすパラメータの一つであることも推察される。

図-5(b)は、放熱管の出入口における流体温度の経時変化を示す。計算値は、出口流体温度の挙動をよく表しており、 $\alpha=100$  (W/m<sup>2</sup>K) における実測値の再現性が最も良い。

図-5(c)は、舗装体温度 $T_p$ の $y$ （鉛直）方向変化である。図中には $T_{pp}$ も矢印で示す。計算値は実測値に比べて、放熱管付近で若干低い。また、

$T_p$ の鉛直分布に及ぼす $\alpha$ の影響は小さい。

図-6 は福井大学内の無散水舗装体の結果である。図-6(a)は、任意時刻における $T_w$ および、 $T_{pp}$ の $x$ 方向変化を、図-6(b)は入口流体温度の変化に対応した出口流体温度の変化を時系列で示したものである。図-6 の定性的な傾向は、図-5 のそれと大差ない。また、 $\alpha$ は 100 (W/m<sup>2</sup>K) と 120 (W/m<sup>2</sup>K) の中間程度の値、110 (W/m<sup>2</sup>K) で実測値の再現性が最も良いと判断される。上述したように道の駅「ハチ北」と福井大学内の無散水舗装体は同じ構成であることを考慮すれば、高熱伝導コンクリート中の鋼製放熱管の熱貫流率 $\alpha$ は、100 (W/m<sup>2</sup>K) ～110 (W/m<sup>2</sup>K) の範囲にある。

図-6(c)は、舗装体温度 $T_p$ の $y$ 方向変化である。計算値は実測値を良好に再現している。

図-7 は屋根融雪コンクリートパネルの結果である。図-7(a)および(b)の結果も、図-5 および図-6 の結果と定性的に違いはない。

特に、図-7(a)より、計算によって得られた放熱管流体温度分布は実測値と一致していることから、本モデルによって $T_w$ の $x$ 方向変化を良好に再現できることが確かめられた。さらに、 $T_{pp}$ がほぼ一様であることは、エコハウスの屋根融雪が均一に行われたことを支持するものである<sup>9)</sup>。

また、 $\alpha$ の値は 55 (W/m<sup>2</sup>K) が最適であると思われる。先の結果と比較して $\alpha$ が小さいのは、放熱管の材質が樹脂管のために熱抵抗が大きいことおよび、屋根融雪コンクリートパネルの熱伝導率が小さいためと考えられる。

表-1 各無散水舗装体の構成と熱物性値

	ハチ北	福井大学内 BHES	エコハウス屋根
融雪パネルサイズ(長さ×幅×厚さ(m))	3×2×0.28	2.5×2×0.16	3.6×1.8×0.07
放熱管内径 (m)	0.019	0.014	0.015
放熱管ピッチ (m)	0.1		
放熱管埋設深 (m)	0.06		0.03
放熱管材料	鋼		樹脂
アスファルト厚 (m)	0.03		
アスファルト熱伝導率 (W/mK)	1.41	1.33	
コンクリート骨材	珪石混入		川砂利
コンクリート熱伝導率 (W/mK)	2.32		1.19
単位融雪面積あたりの循環流量 (l/min・m <sup>2</sup> )	0.7	0.7	0.4

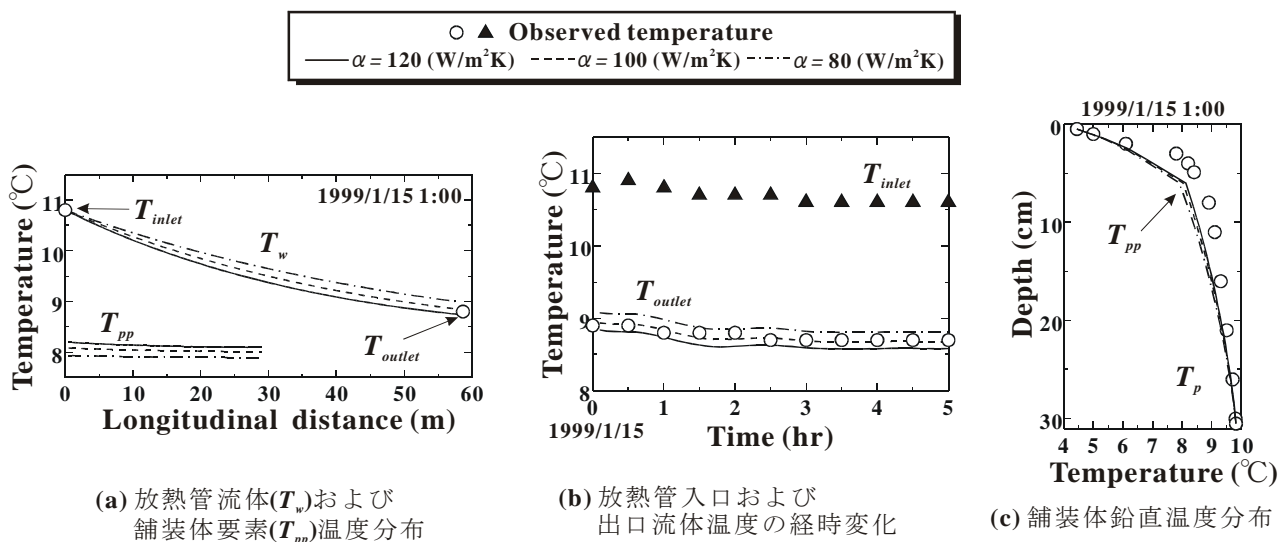


図-5 ハチ北における実測および解析の結果比較

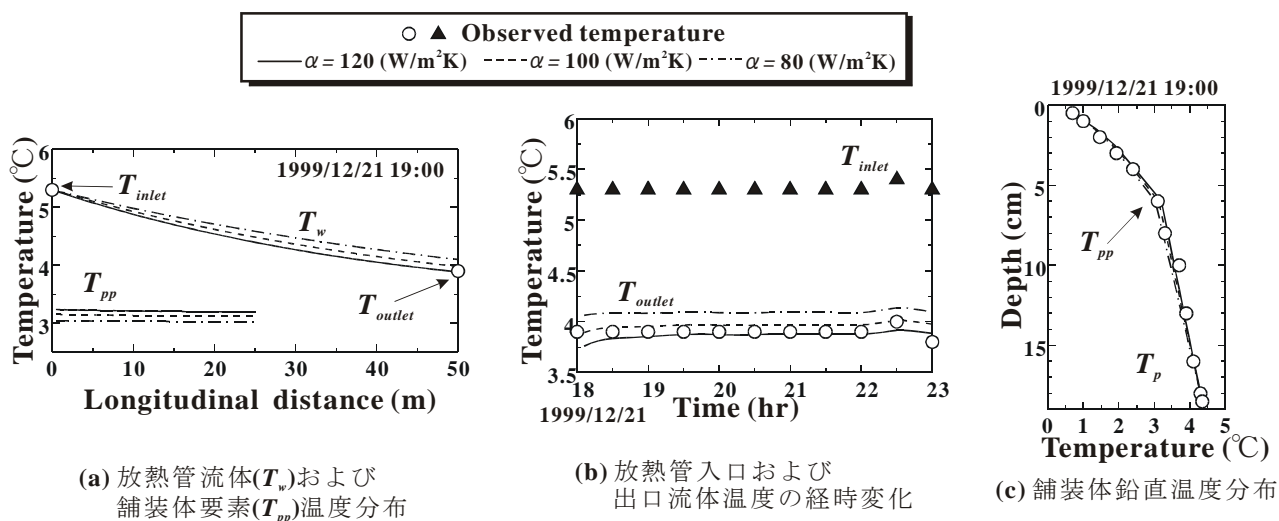


図-6 エコハウス屋根における実測および解析結果の比較

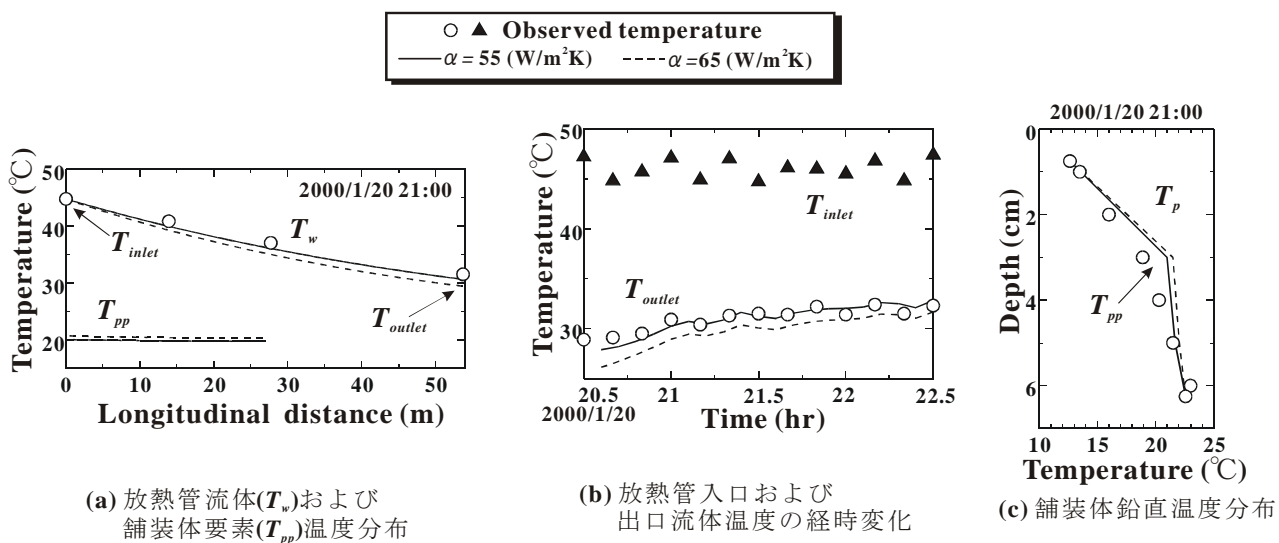


図-7 エコハウス屋根における実測および解析結果の比較

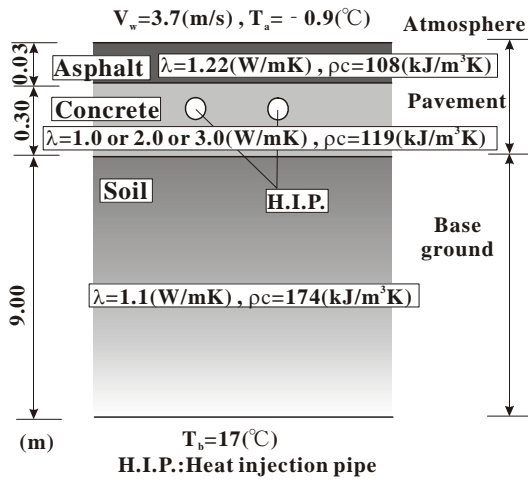


## 5. 舗装体熱フラックスに及ぼす諸因子の影響

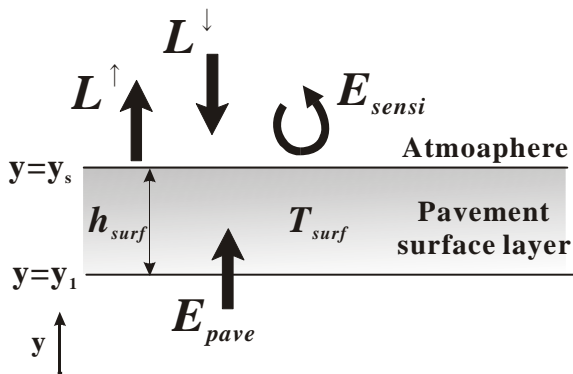
舗装体熱フラックスに及ぼす放熱管の埋設深および舗装体（コンクリート）の熱伝導率の影響について、道の駅「ハチ北」の無散水舗装体の構成、熱物性値および観測結果を基に検討を行った。解析条件は以下のとおりである。

- (1) 放熱管熱貫流率 $\alpha$ は、110 (W/m<sup>2</sup>K) とする。
- (2) 計算は夜間を対象とし、気象条件は、気温 -0.9℃、風速 3.7 (m/s) で一定とする。
- (3) 単位融雪面積あたりの循環流量は 0.7 (l/min・m<sup>2</sup>) とする。
- (4) 舗装体下の地盤は、9m下方まで均一な土質とし、その地点の温度（解析底部温度）は 17℃一定とする。

その他の計算条件（舗装構成と厚さ、熱伝導率 $\lambda$ 、体積熱容量 $\rho c$ ）は図-9(a)に示すとおりである。



(a) 解析条件



(b) 舗装体表面層の熱収支

図-9 舗装体伝熱解析の諸条件および表面層の熱収支

最後に、図-9(b)に基づいた、舗装体表面層の熱収支式を以下に示す。

$$(\rho c)_p h_{surf} \frac{dT_p}{dt} = E_{sen} + L^\downarrow - L^\uparrow + E_{pave} \quad (10)$$

ここに、

$$E_{sensi} = \alpha_{win} (T_{air} - T_{surf}) \quad (11)$$

$$L^\downarrow = \varepsilon \sigma T_{atm}^4 \quad (12)$$

$$L^\uparrow = \varepsilon \sigma T_{surf}^4 \quad (13)$$

$$E_{pave} = -\lambda_p \left. \frac{dT_p}{dy} \right|_{y=y_1} \quad (14)$$

ここで、 $E_{sensi}$ :舗装表面と大気の間で輸送される顕熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)、 $L^\downarrow$ :天空から舗装体への長波放射フラックス (W/m<sup>2</sup>)、 $L^\uparrow$ :舗装体表面から天空への長波放射フラックス (W/m<sup>2</sup>)、 $E_{pave}$ :舗装体熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)、 $h_{surf}$ :舗装体表面層厚さ (m)、 $\alpha_{win}$ :風による舗装体表面と大気間の熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>K)、 $\sigma$ :ステファン・ボルツマン定数  $5.67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)、 $\varepsilon$ :射出率、 $T_{atm}$ :天空温度 (K)、 $T_{surf}$ :舗装体表面層温度 (K)、 $T_{air}$ :気温 (K) である。

式(10)を簡便化して、右辺の純長波フラックスと顕熱フラックスの和を、

$$E_{sensi} + L^\downarrow - L^\uparrow = \bar{\alpha} (T_{air} - T_{surf}) \quad (15)$$

とする。ここに、 $\bar{\alpha}$ :総合熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>K) であり、 $\bar{\alpha}=20$  (W/m<sup>2</sup>K) を用いる。

### 5.1. 放熱管埋設深の影響

埋設深は歩道融雪を考慮した 0.03m、車道融雪を考慮した 0.06m、0.07m および 0.08m の 4 種類を選ぶ。以下では、熱的平衡状態に達したときの結果を示す。

図-10(a)に放熱管の埋設深と舗装体熱フラックスの関係を、図-10(b)に舗装体温度の鉛直分布を示す。

同図(a)より、舗装体熱フラックスは、埋設深が浅くなるに従って線形的に増大する。

また、同図(b)より、埋設深が浅くなるにつれて、舗装体表面温度は上昇するが、舗装体内部の温度

は低下することが分かる．放熱管の埋設深 0.06m~0.08m では, 舗装体温度の鉛直分布に大差は見られない．

## 5.2. 舗装体の熱伝導率の影響

アスファルト層下のコンクリートは, 普通骨材や珪石骨材入りのコンクリートを想定して<sup>10)</sup>, 熱伝導率 $\lambda$ を 1 (W/mK), 2 (W/mK), 3 (W/mK) の 3 種類とした．

計算結果を図-11 に示す．同図(a)より, 舗装体熱フラックスは舗装体の熱伝導率の増加とともに, 線形的に増加する．

同図(b)より, 舗装体表面温度は, 舗装体の熱伝導率の増加に伴い上昇する．また舗装体内部の温度は, 熱伝導率が小さいほど放熱管下部で高くなり, 放熱管上部で低くなる．換言すれば, 舗装体表面に熱が伝わり難いほど, 放熱管下部の温度は上昇しやすいことが知れる．

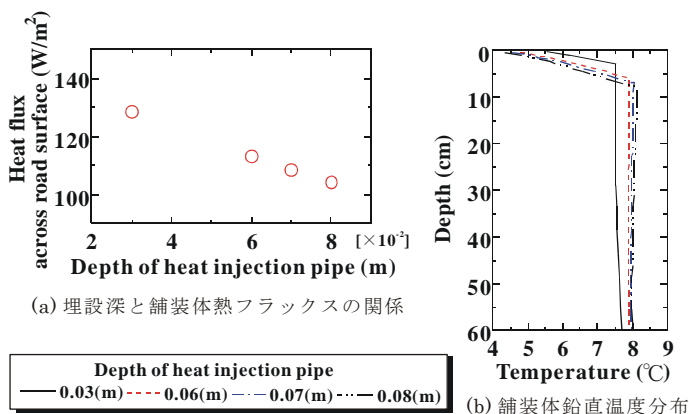


図-10 放熱管埋設深が舗装体熱フラックスに与える影響

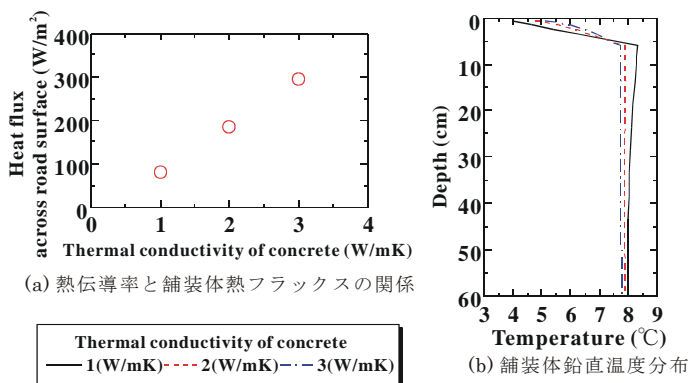


図-11 アスファルト層下のコンクリートの熱伝導率が舗装体熱フラックスに及ぼす影響

## 6. おわりに

無散水舗装体中の放熱管の配管, すなわち, 「往き」放熱管と「戻り」放熱管が隣接して配置されるような往復多重並行配管を考慮した舗装体伝熱モデル (往復並行配管伝熱モデル) を構築し, その妥当性を検討した．さらに, 放熱管の埋設深および舗装体の熱伝導率が舗装体熱フラックスに及ぼす影響を数値解析より示した．

本研究により得られた結論を, 以下に列举する．

- (1) 本伝熱モデルより, 高熱伝導コンクリート中の鋼製放熱管の熱貫流率は 100 ~ 110 (W/m²K) の値, 普通コンクリート中の樹脂製放熱管のそれは 55 (W/m²K) 程度であり, 熱貫流率は放熱管の材質と舗装体の熱伝導率により大きく変化する．
- (2) 往復多重並行配管の舗装体表面温度は, ほぼ一樣になることが示され, 本伝熱モデルにより融雪むらは生じ難いことが説明できた．
- (3) 放熱管の埋設深が浅くなるにつれ, また, 舗装体の熱伝導率が大きくなるにつれて, 舗装体熱フラックスは線形的に増大することが分かった．

## 参考文献

- 1) 竹内大三郎・足立英夫：豪雪地帯の都市における融雪装置付き雪捨て場について, 雪氷 44 巻 2 号, pp.73-82, 1982
- 2) 浦上晃一・佐藤守：低温な地下水を用いた道路融雪の実験, 温泉工学会誌, Vol. 19, No. 2/3, pp. 41-62, 1985
- 3) 熊谷元伸・野原以左武：地下水を利用による無散水工法の実用化に関する研究, 国立防災科学技術センター研究報告, 第 41 号, pp. 285-305, 1988.
- 4) 宮本重信・藤野間幸英・久保俊章：無散水歩道融雪と散水車道融雪のセット化, 福井県建設・雪対策技術センター年報第 1 号, pp. 32-57, 1998
- 5) 福原輝幸・橋本泰英：放熱管を有する舗装体の融雪能力, 水工学論文集, 第 36 巻, pp. 721-724, 1992.
- 6) 福原輝幸・阪本信弘：地中熱による路面温度制御 — 冬期融雪および夏期路面冷却 —, 土木学



会誌 10 月号, pp. 63-65, 1999

7) 谷本俊夫・吉武勇・中村秀明・谷直彦・浜田純夫:温水パイプによる橋梁床版の融雪・凍結防止システムに関する研究, 土木学会論文集, No. 595 /VI-39, pp. 103-116, 1998

8) 日本道路協会:道路防雪便覧, pp.167

9) 熊井和雄・藤拓也・福原輝幸:年間を通じた地中熱利用技術の研究, アーバンインフラテクノロジー第 14 回技術研究発表論文, pp.61-64, 2003

10) 福原輝幸・森山和馬・大木政弘・渡邊洋:掘削杭熱交換システムと高熱伝導舗装体による路面融雪, 第 13 回寒地技術シンポジウム寒地技術論文・報告集, vol.13, pp.101-106, 1997